

基于幅相调控特性的双极化低散射超表面天线*

吴天昊 杨欢欢[†] 李桐[‡] 季轲峰 张芷昀 廖嘉伟 邹靖

(空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

(2025年6月26日收到; 2025年7月27日收到修改稿)

针对天线雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 减缩设计难度大、优化耗时长等问题, 本文采用“先散射后辐射”的低 RCS 天线设计思路, 并基于混合机制实现天线的双极化 RCS 减缩, 提出了一种双极化低散射超表面天线, 克服了传统低 RCS 天线设计方法存在的弊端. 首先, 基于超表面的幅相调控特性设计了一款双极化低 RCS 超表面, 实现了对不同极化入射波的反射波束的独立调控; 然后, 在低 RCS 超表面的基础上, 通过借鉴传统贴片天线辐射结构, 对超表面结构进行局部调整并采用同轴馈电激励以实现天线辐射; 最后, 结合电流分布微调辐射结构, 快速优化天线辐射性能. 经过仿真和实验验证, 提出的天线不仅具有良好的辐射性能, 同时也能够实现带内带外双极化 RCS 减缩. 与传统低 RCS 天线设计方法相比, 本文采用的“先散射后辐射”逆向设计思路和提出的混合机制实现天线双极化 RCS 减缩的新方法, 有效化解了超表面天线紧凑结构带来的辐射与低散射耦合矛盾, 大大简化了低散射超表面天线的设计流程, 且设计的天线采用单层介质实现 RCS 减缩, 具有结构简单、紧凑、剖面低的特点.

关键词: 电磁超表面, 天线, 幅相调控, 低雷达散射截面

PACS: 41.20.Jb, 78.67.Pt, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.74.20250838

CSTR: 32037.14.aps.74.20250838

1 引言

超表面是一种新型的人工电磁材料, 其是由亚波长尺寸的人工电磁单元按照特定规律排列形成的二维平面结构^[1]. 与传统超材料相比, 超表面具有低剖面、低损耗、可集成、高自由度等优势^[2-7], 其通过调控电磁波幅度、相位和极化等特性可以实现电磁隐身^[8,9]、波传播模式转换^[10,11]、全息成像^[12,13]、异常反射折射^[14-16]等功能. 随着研究深入, 悬链电磁理论的建立及应用为超表面的高效设计提供了理论框架和工程方法, 进一步提高了超表面的调控性能^[17-19]. 天线作为通信与探测系统的重

要组成部分, 其辐射性能直接决定了系统的信息传输效率. 随着雷达探测技术的发展, 传统天线的强散射性能短板愈发凸显. 常规的低散射设计手段如涂覆吸波材料、外形设计等, 往往会导致天线的辐射效率下降、方向图畸变. 超表面凭借其对电磁波的独特调控能力, 为解决天线辐射性能与低散射需求之间的矛盾提供了新的思路与途径.

近年来, 将超表面用于低散射天线设计为隐身天线设计提供了全新范式. 从超表面与天线的结构关系看, 现有的研究可以归纳为两种主流的设计范式: 超表面加载式设计和超表面与天线一体化设计. 第一种范式是在已有天线结构周围加载超表面, 利用超表面的电磁调控特性重构天线的散射场

* 国家自然科学基金 (批准号: 62371466, 62401618, 62171460) 和陕西省自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2024JC-ZDXM-39, 2025JC-YBMS-708, 20220104, 2020022) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jianye8901@126.com

[‡] 通信作者. E-mail: tongli8811@sina.com

分布. 例如, Xue 等^[20]提出了一种基于微带谐振器和吸收型频率选择表面 (absorptive frequency selective surface, AFSS) 的微带阵列天线宽带雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 减缩方法. 利用 AFSS 在 1.9—7.5 GHz 的宽带吸收特性和在高频 11.05 GHz 处的传输特性实现天线带外 RCS 减缩, 同时保持天线的辐射性能. Li 等^[21]将环形超表面加载在圆形天线周围, 并在超表面上添加金属过孔, 避免了天线辐射性能恶化, 同时实现了天线的带内带外 RCS 减缩. 第二种范式是直接激励超表面构造天线, 或者将天线单元直接视为超表面单元, 通过借鉴超表面的 RCS 减缩机制优化天线结构, 使天线在正常辐射的同时兼具低散射功能. 该方法又可以分为单元式一体化低 RCS 设计与阵列式一体化低 RCS 设计两种. 单元式一体化天线设计方法是在不破坏天线原有辐射性能的基础上, 将原有结构修改成低散射结构. 李桐等^[22]提出了一种基于极化旋转表面的一体化低 RCS 天线设计方案, 将极化旋转表面与贴片天线融合, 经过仿真优化, 最终在 X 波段实现了天线增益和 RCS 减缩性能的提升. Rana 和 Jain^[23]提出了一种共面波导馈电的圆极化高增益宽带低散射天线. 利用特征模理论分析设计的超表面结构不仅提升了天线的带宽和增益, 同时也抑制了主导散射的模式. 测量结果显示, 该天线在 3.7—10.65 GHz 频率范围内具有 96.93% 的阻抗带宽, 在 10—24 GHz 范围内实现了 RCS 减缩, 最大减缩量达 -19 dB. 冯奎胜等^[24]通过设计两个辐射性能相似但对照射波反射相位相差 180° 的单元, 将这两种单元组成天线阵列, 利用相位相消效应实现低散射特性. Liu 等^[25]设计了两种同模式、同频带工作的天线单元, 通过引入互补开口谐振环结构实现两种单元反射相位的精确调控, 并构建了 4×4 阵列, 实现了双极化带内 RCS 减缩; Liu 等^[26]进一步通过在天线单元中加载有源器件实现反射相位的动态可调功能, 构建的超表面天线编码阵列在保持天线辐射功能的同时, 可通过改变编码序列实现散射场的精准重构.

综上所述, 研究者们已经提出了多种设计方案, 成功实现了天线 RCS 的减缩, 为天线隐身技术发展提供了重要理论支撑和工程应用参考. 但已有的设计仍面临一些挑战. 一方面, 超表面加载式设计将超表面与天线直接组合到一起, 两者间的耦合效应引发了辐射保持与散射抑制的矛盾, 使得设

计参数调整难以基于先验知识进行, 须依赖全波仿真结果进行迭代优化, 这一过程使得设计中的计算量大大增加. 另一方面, 单元式一体化天线的结构紧凑、集成度高, 导致电磁耦合更为复杂, 辐射与散射抑制的矛盾也更为突出. 同时, 受限于有限的结构调整空间和较小的等效辐射口径, 其工作带宽与辐射增益往往难以提升; 而阵列式一体化设计方法则需要设计两种辐射性能相同但反射相位相反的天线单元, 导致设计过程繁琐、设计周期长, 且只有天线阵列能实现低散射效果. 此外, 针对一体化设计方法, 如何实现带内双极化低 RCS 性能也是一个挑战.

针对上述问题, 本文采用“先散射后辐射”的低 RCS 天线设计思路, 并基于超表面幅相调控特性, 提出了混合机制实现天线双极化 RCS 减缩的新方法. 这种方法利用辐射和散射的激励不同特点, 设计不同的辐射、散射电流路线, 不仅化解了辐射和散射矛盾, 实现了天线双极化 RCS 减缩, 设计的天线还具有结构简单、紧凑、低剖面的特点.

2 基于幅相调控特性的双极化低 RCS 超表面

低散射超表面天线设计主要分为辐射设计和低散射设计两个部分. 现有方法大多按照先辐射后优化低散射的思路进行, 而散射的优化相对辐射更加耗时, 且需同时兼顾辐射性能, 导致低 RCS 天线设计效率较低. 低 RCS 超表面的设计理论已经相对成熟, 以此为基础, 本文采用先低散射后辐射的思路, 在低 RCS 超表面的基础上引入辐射激励, 快速得到低 RCS 天线.

本文首先综合利用超表面的幅相调控特性设计了一款双极化低 RCS 超表面. 如图 1(a) 所示, 提出的超表面单元由双面印刷的单层介质板构成, 其中顶层金属结构为矩形, 中间层介质为 F4B 微波材料, 其相对介电常数为 2.65, 底层为金属地板. 以该单元组成 4×4 阵列, 如图 1(b) 所示, 所有矩形贴片的边长 L_y 沿 y 方向成梯度变化, 所有矩形贴片的边长 L_x 均相同, 相邻贴片通过阻值为 R 的电阻沿 x 方向连接在一起.

对于 y 极化入射波, 根据广义斯涅耳定律, 该超表面可以将垂直入射波反射至梯度相位方向, 从而降低后向散射能量. 结合图 1(c) 和图 2(a) 对

y 极化方向波束偏折原理进行具体分析. 图 2(a) 展示了不同频率下附加相位与边长 L_y 的关系曲线. 表 1 为不同中心频率对应的矩形贴片边长 L_y 的取值情况. 贴片单元采用 4×4 规格组阵, 根据长度相位差关系曲线, 按照贴片对照射波反射相位 90° 相位差确定贴片长度, 构成相位梯度分布. 根据广义斯涅耳定律和费马原理, 图 1(c) 中由 A 点发出的电磁波可以通过 ABC 与 ADC 两条路径到达 C 点, 由于相邻波束传播经历的光程相等, 电磁波入射角 θ_i 与反射角 θ_r 满足如下等式:

$$k_0 n_i \sin \theta_i dy + \varphi + d\varphi = k_0 n_i \sin \theta_r dy + \varphi, \quad (1)$$

其中, k_0 为波数, θ_i 为入射角, θ_r 为反射角, φ_0 为入射电磁波经单元反射后产生的附加相位, $d\varphi$ 为相邻单元间的附加相位差, dy 为相邻单元间的距离.

当入射角 $\theta_i = 0^\circ$ 时, 反射角由相位梯度 $d\varphi/dy$ 决定:

$$\theta_r = \arcsin \left(\frac{1}{k_0} \frac{d\varphi}{dy} \right). \quad (2)$$

因此, 通过引入 y 极化方向的相位梯度即可使反射波束发生偏折, 实现 RCS 减缩. 图 2(b) 展示了 L_y 不同取值对应的 y 极化单站 RCS 曲线, 可以看出上述超表面与同尺寸的金属板相比具有明显的 RCS 减缩效果.

对于 x 极化入射波, 该超表面利用贴片电阻的吸波特性和消耗电磁能量, 降低反射波幅度. 当 x 极化电磁波照射到超表面时, 金属贴片与电阻间产生感应电流并构成谐振回路. 由图 3(a) 可知, 随着 L_x 的变化, 最大 RCS 减缩频率发生变化. 这是由于 L_x 的变化引起了电流路径的变化, 谐振频率

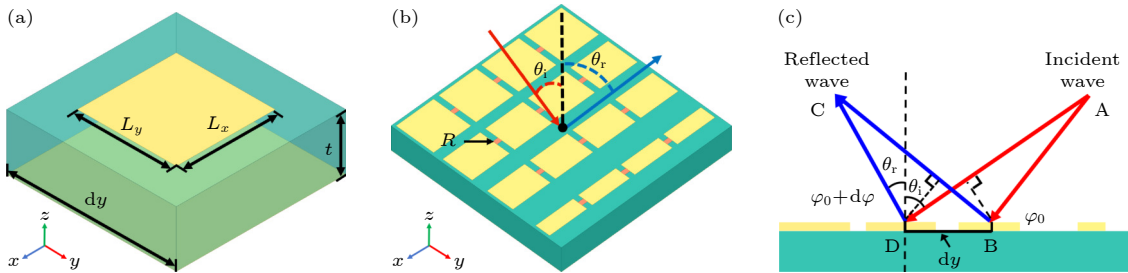


图 1 超表面结构 (a) 单元透视图; (b) 表面俯视图; (c) 反射电磁波偏折原理

Fig. 1. Metasurface structure: (a) Perspective view; (b) top view; (c) the principle of refraction of electromagnetic waves.

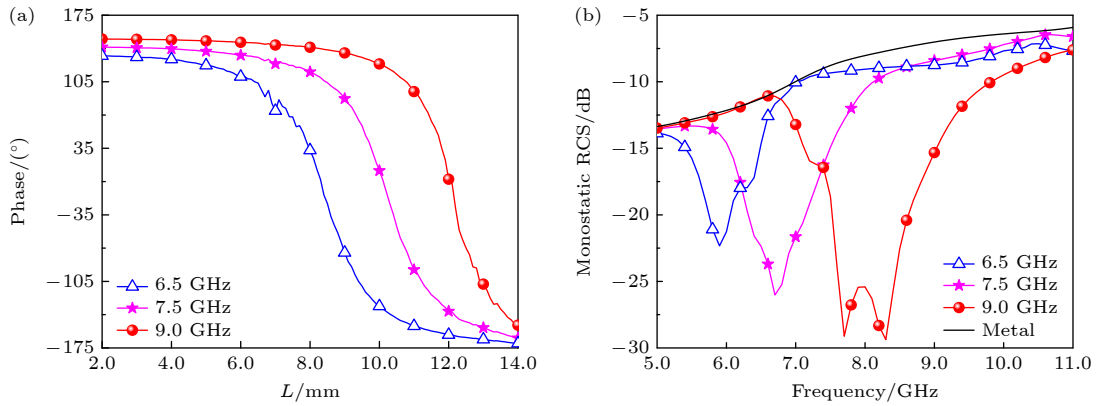


图 2 y 极化相位调控性能 (a) 反射相位; (b) 表面单站 RCS

Fig. 2. Phase control performance of y -polarization: (a) Reflection phase; (b) RCS of proposed surface.

表 1 矩形贴片边长 L_y 取值与中心频率对应关系 ($L_x = 12.0$ mm)

Table 1. Relationship between the side length L_y of the patch and the frequency ($L_x = 12.0$ mm).

频率/GHz	第一矩形贴片边长 L_{y1} /mm	第二矩形贴片边长 L_{y2} /mm	第三矩形贴片边长 L_{y3} /mm	第四矩形贴片边长 L_{y4} /mm
6.5	13.2	12.2	11.6	4.1
7.5	11.9	10.5	9.6	3.8
9.0	10.3	8.8	7.9	3.5

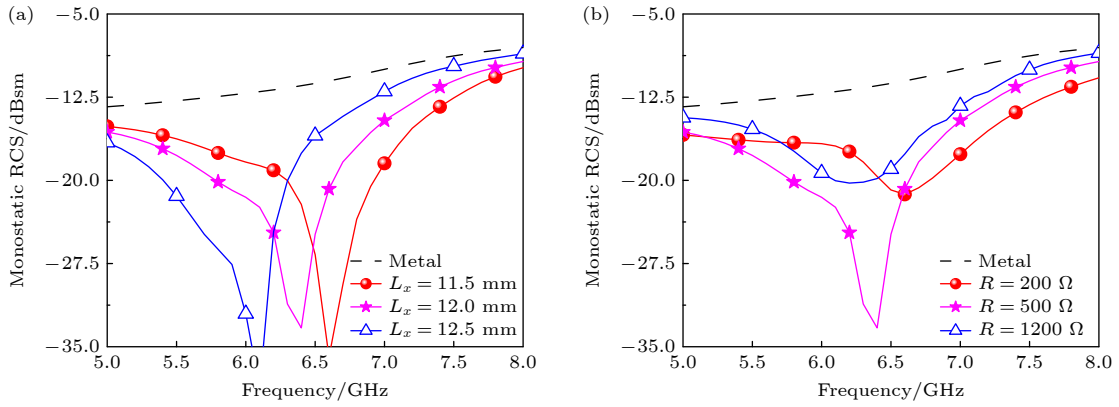


图3 x 极化表面单站 RCS 曲线 (a) $L_{y1} = 11.9$ mm, $L_{y2} = 10.5$ mm, $L_{y3} = 9.6$ mm, $L_{y4} = 3.8$ mm, $R = 500$ Ω ; (b) $L_x = 12.0$ mm, $L_{y1} = 11.9$ mm, $L_{y2} = 10.5$ mm, $L_{y3} = 9.6$ mm, $L_{y4} = 3.8$ mm

Fig. 3. X-polarized RCS of proposed surface: (a) $L_{y1} = 11.9$ mm, $L_{y2} = 10.5$ mm, $L_{y3} = 9.6$ mm, $L_{y4} = 3.8$ mm, $R = 500$ Ω ; (b) $L_x = 12.0$ mm, $L_{y1} = 11.9$ mm, $L_{y2} = 10.5$ mm, $L_{y3} = 9.6$ mm, $L_{y4} = 3.8$ mm.

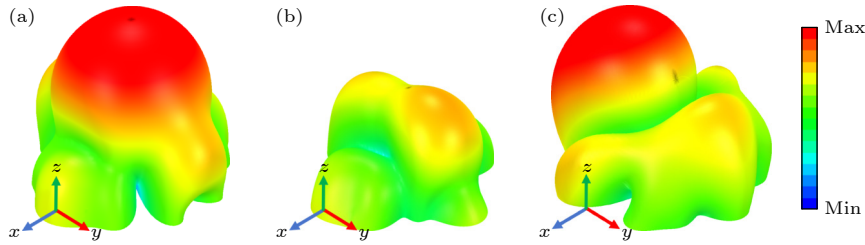


图4 超表面散射方向图 (a) 金属板; (b) x 极化; (c) y 极化

Fig. 4. Scattering patterns of the metasurface: (a) Metal; (b) x polarization; (c) y polarization.

发生改变. 图 3(b) 表明了电阻 R 的取值与 x 极化方向 RCS 减缩幅度的关系. 当电阻取值 $R = 500$ Ω 时, 超表面的等效阻抗与空间波阻抗近似相等. 此时入射波无反射地进入谐振回路并被电阻吸收, 电磁波幅度损耗达到最大, RCS 减缩效果最好.

为了验证上述理论分析是否符合预期效果, 采用 x 极化波和 y 极化波垂直照射超表面和金属板, 得到的三维散射方向图如图 4 所示. 图 4(b) 中散射波束在各方向的强度都有减弱, 图 4(c) 中散射波束偏离法线方向. 通过上述对不同极化方向 RCS 减缩原理的分析, 结合仿真实验结果可以证明, 设计结构能够有效实现双极化 RCS 减缩.

3 基于混合机理的低散射超表面天线设计

贴片天线因其低剖面、结构简单、易于共形等显著优势, 非常适合作为超表面天线的辐射单元. 基于“先低散射设计、后辐射优化”的天线设计思路, 在上述双极化低 RCS 超表面的基础上, 通过借鉴传统贴片天线的几何特征, 调整表面结构参数

并引入馈电激励. 在保持超表面原有低散射特性的前提下, 实现了辐射性能的有效提升.

3.1 天线结构设计及辐射性能分析

为更清晰地阐释上述设计思路, 图 5 给出了超表面天线的优化设计流程. 蓝色符号代表传统方法设计流程, 红色符号代表“先散射后辐射”设计流程. 采用“先散射后辐射”设计思路^[22], 参照贴片天线的辐射结构, 将图 5(a) 虚线框内的贴片相连, 添加同轴馈电后得到图 5(d) 所示天线 1 结构.

为了更好地研究天线的辐射性能, 现对天线表面电流分布进行分析. 对比图 6 中的表面电流分布图 (黑色箭头表示电流方向) 可知, 参考天线辐射贴片表面的电流矢量方向一致, 电流矢量的同向叠加使天线能够实现有效辐射. 与参考天线相比, 天线 1 辐射贴片中间区域为电流波节, 其两侧电流相位相互倒置, 电流矢量方向相反, 无法形成聚焦波束, 所以天线 1 不能正常辐射. 这是由于图 5(d) 中相连的贴片长度约为一个波长, 此时天线工作在 TM_{20} 模式, 因此贴片上出现了反向电流. 为了解

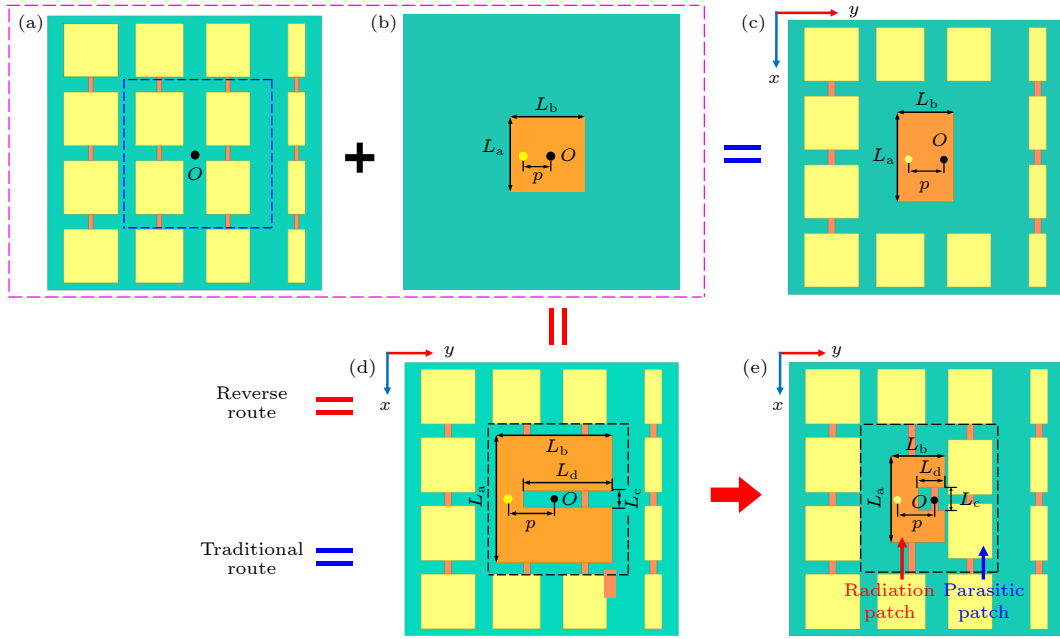


图 5 超表面天线设计过程 (a) 超表面; (b) 参考天线; (c) 传统设计天线; (d) 天线 1; (e) 天线 2

Fig. 5. Design process of metasurface antennas: (a) Metasurface; (b) reference antenna; (c) traditional antenna; (d) antenna 1; (e) antenna 2.

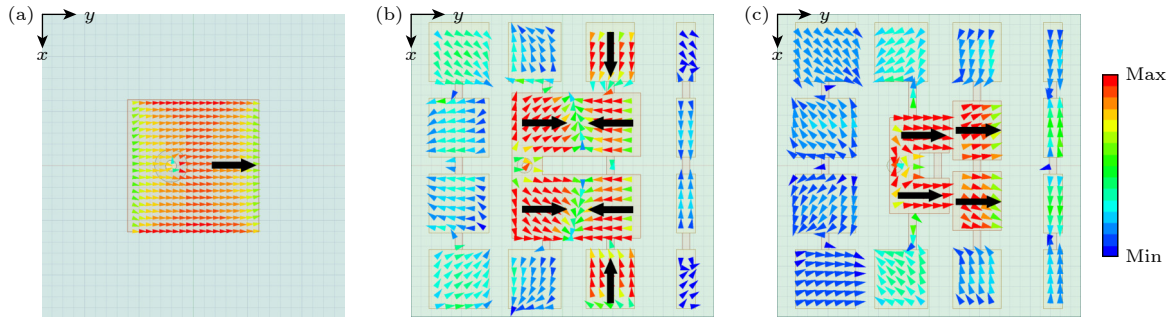


图 6 辐射电流分布图 (a) 参考天线; (b) 天线 1; (c) 天线 2

Fig. 6. Radiation current distribution map: (a) Reference antenna; (b) antenna 1; (c) antenna 2.

决电流反向的问题, 考虑将贴片截断为如图 5(e) 所示的辐射贴片与寄生贴片. 辐射贴片与同轴馈线相连, 长度约为半波长, 此时天线工作在 TM_{10} 模式, 辐射贴片的电流设为 I_1 . 辐射贴片与寄生贴片的等效电路如图 7 所示. 寄生贴片与辐射贴片间距很小, 两者的互容 C 远大于互感 M , 电场耦合占主导作用. 寄生贴片上的感应电压 $U = I_1/(j\omega C)$. 寄生贴片的电长度约为 0.4 波长, 其等效阻抗 $Z_2 = 1/(j\omega C_2)$, 呈容性, 因此, 寄生贴片的感应电流 $I_2 = U/[1/(j\omega C_2)] = C_2/C \cdot I_1$. 根据上述推导可知, 电流 I_1 与 I_2 方向相同, 电流反向问题得到解决.

图 8 对比了上述天线的辐射性能. 由图 8(a) 可知, 传统设计天线、天线 1 和 2 都有有效的 -10 dB 阻抗带宽. 图 8(b) 表明, 在 6.4—7.3 GHz 频

段内, 参考天线的增益稳定在 6.6 dBi 附近, 而传统设计天线的增益较参考天线明显下降, 这正是由于辐射与散射的耦合造成的; 而天线 2 的增益较参考天线有提升, 最大提升幅度约 2 dB. 图 8(c)—(f) 对比了天线在 6.8 GHz 处的三维辐射方向图, 可见, 天线 2 与参考天线有相似和较好的法向辐射.

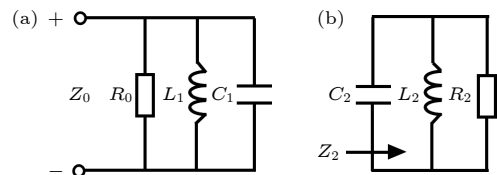


图 7 天线 2 辐射结构等效电路图 (a) 辐射贴片; (b) 寄生贴片

Fig. 7. Equivalent circuit diagram of the antenna 2 radiation structure: (a) Radiation patch; (b) parasitic patch.

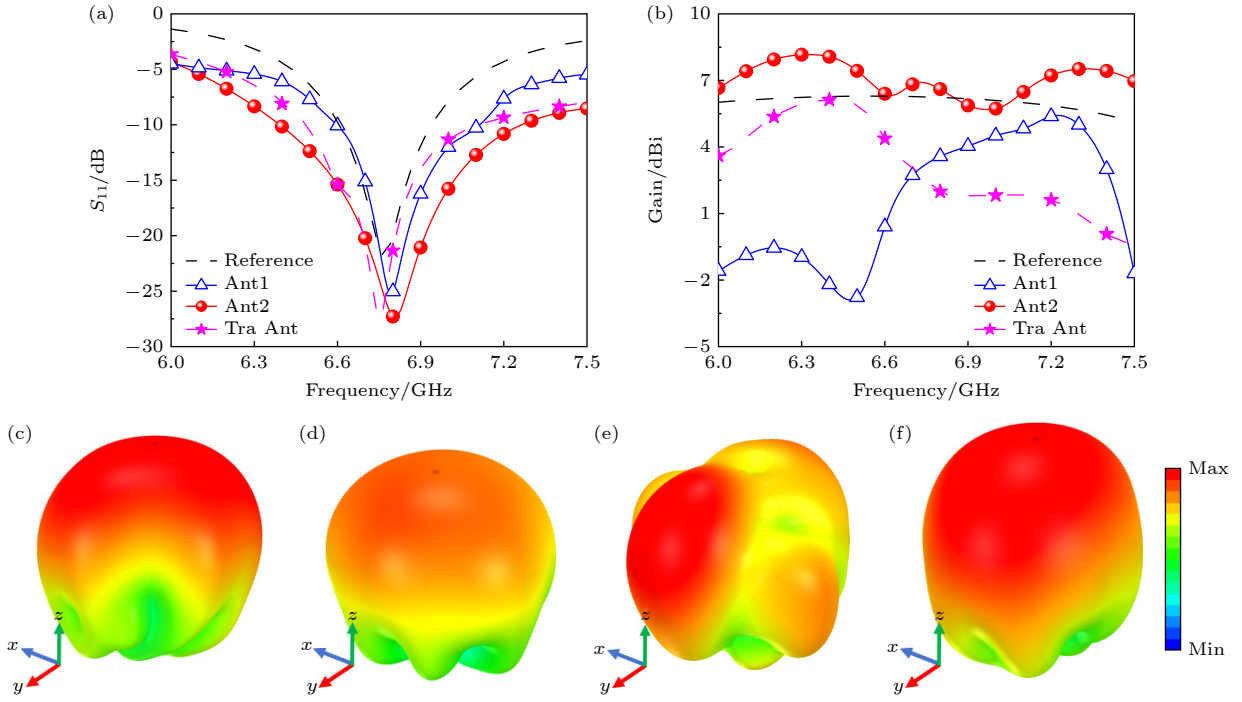


图 8 天线辐射性能 (a) 反射系数; (b) 增益. 6.8 GHz 处三维辐射方向图 (c) 参考天线; (d) 传统设计天线; (e) 天线 1; (f) 天线 2
 Fig. 8. Radiation performance comparison of the antennas: (a) Reflection coefficient; (b) gain. 3D radiation patterns at 6.8 GHz: (c) reference antenna; (d) traditional antenna; (e) antenna 1; (f) antenna 2.

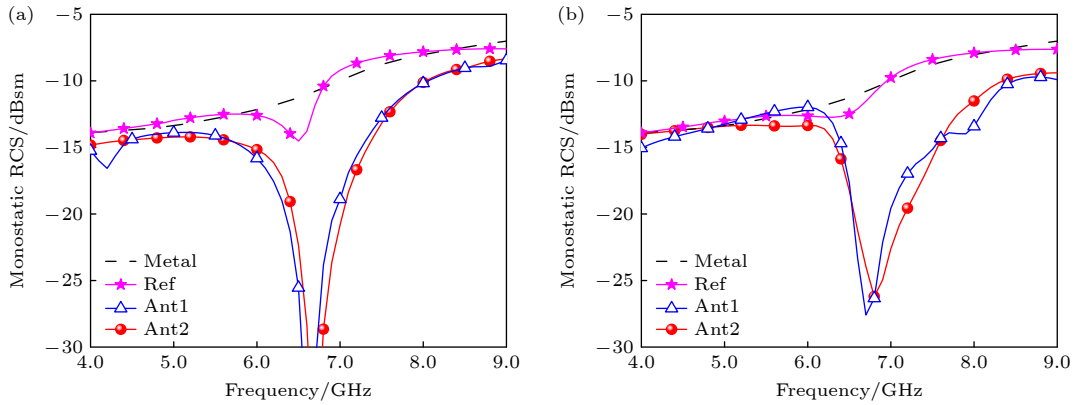


图 9 天线 RCS 对比 (a) x 极化; (b) y 极化
 Fig. 9. RCS comparison of the antennas: (a) x polarization; (b) y polarization.

3.2 天线散射性能分析

为了验证天线 2 的散射性能是否发生变化, 是否维持超表面原有的低散射性能, 对其散射特性进行分析. 图 9 展示了不同极化方向的电磁波垂直入射到金属板、参考天线、天线 1 和 2 时的单站 RCS 结果. 天线 2 的辐射工作频段 ($|S_{11}| < -10$ dB) 为 6.4—7.3 GHz. 在该频段内, 天线 2 相比参考天线对 x 极化波的 RCS 平均减缩量为 11.7 dB, 对 y 极化波的 RCS 平均减缩量为 10.5 dB. 图 10(a)—(c) 和图 10(d)—(f) 分别展示了 x 和 y 极化电磁波入射时, 参考天线、天线 1 和 2 的三维散射方向图,

从中能够发现, 在 x 极化电磁波入射时, 天线 1 和 2 的反射波幅度较小, 这证实了 x 极化方向吸波结构的有效性; 而在 y 极化电磁波入射时, 天线 1 和 2 的散射峰值方向偏离法线, 表明两者依然维持了超表面的散射波束偏折功能.

为了更清晰地了解天线 2 结构实现 RCS 减缩的原理, 现对天线表面电流分布进行分析. 如图 11(a), (b) 所示, 在 y 极化波照射下, 天线 2 和超表面上的电流都沿 y 方向, 且两者强度分布规律非常相似; 如图 11(c), (d) 所示, 在 x 极化波照射下, 天线 2 在馈电附近的电流与超表面有差别, 表明

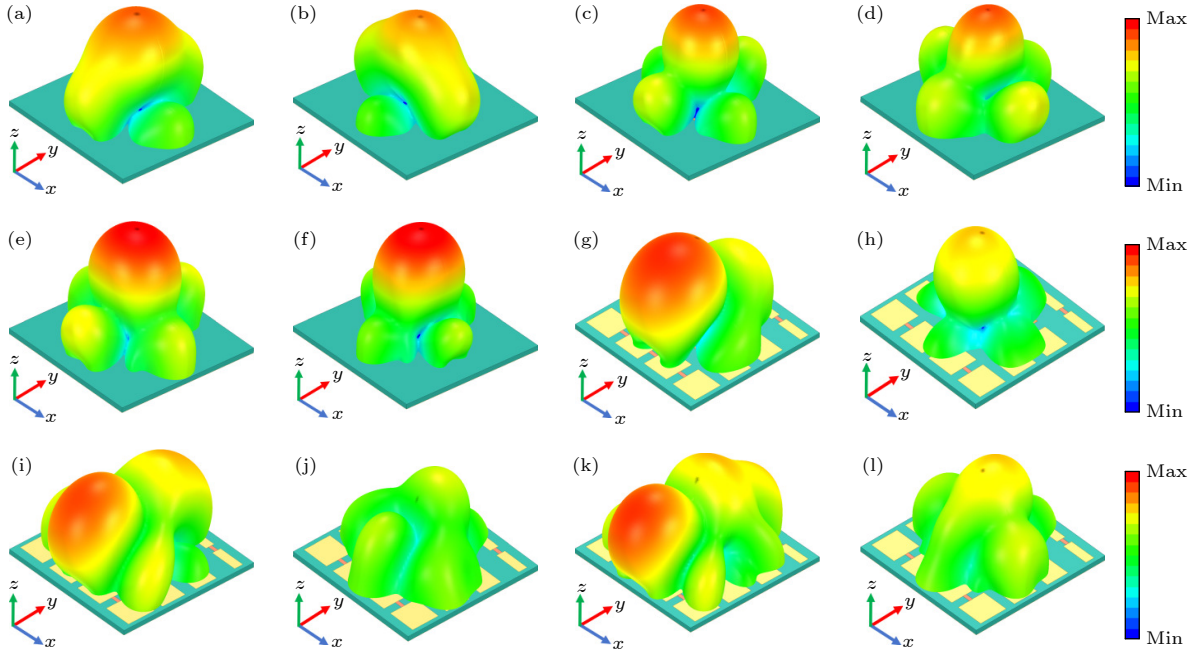


图 10 三维散射方向图 (a)–(f) 参考天线; (g)–(l) 天线 2

Fig. 10. Scattering patterns of the antennas: (a)–(f) Reference antenna; (g)–(l) antenna 2.

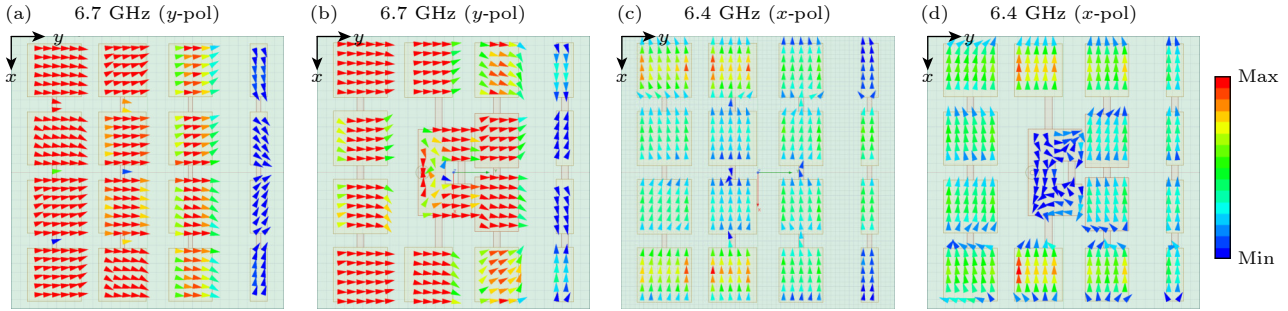


图 11 散射电流分布对比 (a)–(c) 超表面; (b)–(d) 天线 2

Fig. 11. Scattering current distribution comparison: (a)–(c) Metasurface; (b)–(d) antenna 2.

电阻电流路径受到了干扰, 但差别处的电流强度较小, 对总体影响不大, 整体上天线 2 和超表面上的电流沿 x 方向且相似; 此外, 对比 x 和 y 极化波照射下的电流可知, x 极化下的电流强度明显更弱, 证实了吸波效果. 总之, 散射电流对比表明, 馈电引入对超表面散射性能的影响总体较小, 即天线 2 继承了超表面的低 RCS 特性.

综上所述, 在天线辐射优化阶段, 为保留超表面原有的低散射性能, 基于低散射超表面结构, 选择易于与其共形的微带贴片天线作为辐射单元, 以最大程度减少对超表面结构的改动. 通过电流分析法结合实验数据对比, 对天线表面电流分布及三维散射特性进行研究, 结果表明辐射优化未对超表面结构的低散射性能产生影响, 从而验证了混合机制实现天线 RCS 减缩, 减小辐射与低散射耦合矛盾

的可行性.

4 加工实测

为了进一步验证上述设计的有效性, 采用印刷电路板技术对图 5(e) 所示的天线 2 进行加工. 图 12(a) 为加工制作的天线样件, 受实验条件所限, 本文采用与文献 [27–29] 相同的空间波法测试天线的 RCS 减缩性能. 如图 12(b) 所示, 空间波法通过一个宽带喇叭天线发射电磁波照射待测天线, 并利用另一个宽带喇叭天线接收经待测天线反射的信号, 这种方法无法直接得到天线的 RCS 绝对值. 但通过分别测试待测天线及其参考, 比较两者的反射信号强度, 其结果可以反映 RCS 减缩值. 图 13(a) 为天线 2 的仿真和实测 $|S_{11}|$ 曲线, 可以看出, 天线 2

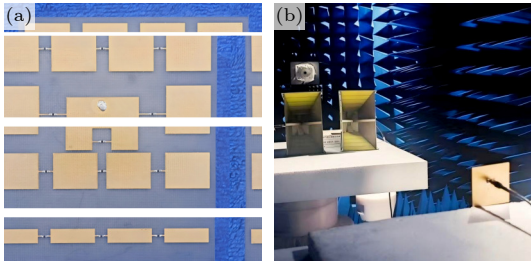


图 12 实验测试 (a) 天线样品; (b) 测试环境

Fig. 12. Experiment: (a) Fabricated antenna; (b) test environment.

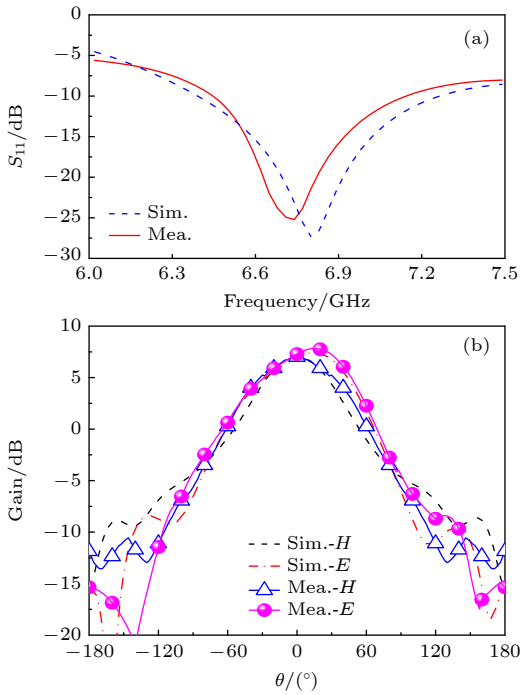


图 13 天线 2 的实测与仿真辐射性能对比 (a) 反射系数; (b) 二维辐射方向图

Fig. 13. Comparison of measured and simulated radiation performance of antenna 2: (a) Reflection coefficient; (b) 2D radiation patterns.

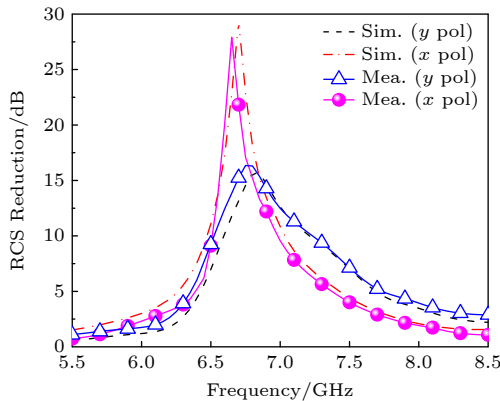


图 14 天线 2 的 RCS 减缩曲线

Fig. 14. Monostatic RCS reduction of antenna 2.

的实测工作频段与仿真工作频段基本重合. 图 13(b) 为 6.7 GHz 处天线 2 的实测和仿真二维辐射方向图, 两者形状基本一致, 实测结果与仿真数据相吻合. 可以看出, 实测和仿真曲线趋势及形状均保持一致. 综上所述, 通过实验测试验证了天线 2 良好的辐射性能与 RCS 减缩性能 (图 14), 进一步证明了“先低散射设计, 后辐射性能优化”的低散射超表面天线设计思路有效性.

5 结论

目前的低散射超表面天线设计大多采用“先辐射后低散射”的设计思路, 即先进行辐射设计得到天线, 然后进行低散射设计降低天线 RCS. 传统“先辐射后散射”的设计思路, 通过在天线周围引入额外的超表面结构实现散射调控, 需要优化散射, 设计效率低, 普遍存在难度大、耗时长、效果差等问题. 本文采用“先散射后辐射”的低 RCS 天线设计思路, 在双极化低散射超表面的基础上, 引入馈电结构激励超表面实现辐射, 快速得到双极化低散射天线. 基于超表面的幅相调控特性, 提出了混合机制实现天线双极化 RCS 减缩的新方法, 有效化解了辐射、散射耦合的矛盾, 这种方法在天线辐射主极化方向利用超表面相位特性实现散射能量空间重构, 利用辐射和散射的激励不同特点, 设计不同的辐射、散射电流路线, 化解了辐射和散射的矛盾; 在天线辐射正交极化方向, 利用超表面吸波特性和直接实现散射能量吸收. 这两种不同的散射抑制机理, 既有效化解了辐射耦合矛盾, 又实现了双极化 RCS 减缩. 经过实验测试, 加工天线实测性能与仿真数据基本吻合. 需要指出的是, 文中给出的设计仅为本文采用的设计思路和提出的设计方法的一个示例, 若将本文的方法与现有的宽带设计结构相结合, 有望实现更宽频带的双极化低 RCS 天线.

参考文献

- [1] Zhang L, Chen X Q, Liu S, Zhang Q, Zhao J, Dai J Y, Bai G D, Wan X, Cheng Q, Castaldi G, Galdi V, Cui T J 2018 *Nat. Commun.* **9** 4334
- [2] Yang H H, Li T, Jidi L R, Gao K, Li Q, Qiao J X, Li S J, Cao X Y, Cui T J 2023 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **71** 4075
- [3] Dhurnal A, Mahesh S B, Bhardwaj A, Saikia M, Malik S, Srivastava K V 2023 *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **65** 96

- [4] Ghosh S, Ghosh J, Singh M S, Sarkhel A 2023 *IEEE Trans. Circuits Syst.* **70** 76
- [5] Ji K F, Zhou Y L, Yang H H, Zhang Z Y, Guo Z X, Li T 2024 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **23** 2046
- [6] Ren J Y, Jiang W, Gong S X 2018 *IEEE Microw. Antennas Propag.* **12** 1793
- [7] Ji K F, Cao X Y, Gao J, Yang H H, Li T, Jidi L Y 2022 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **70** 11537
- [8] Yang H H, Li T, Xu L M, Cao X Y, Jidi L R, Guo Z X, Li P, Gao J 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 1239
- [9] Luo X Y, Guo W L, Chen K, Zhao J M, Jiang T, Liu Y 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 3332
- [10] Ji K F, Zhou Y L, Yang H H, Zhang Z Y, Li T, Li S J 2024 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **73** 149
- [11] Ji K F, Zhou Y L, Yang H H, Li T, Li S J, Zhang Z Y 2025 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **24** 1302
- [12] Zhang Z Y, Zhou Y L, Li S J, Tian J H, Cong L L, Yang H H, Cao X Y 2024 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **16** 65635
- [13] Zhang Z Y, Li S J, Zhou Y L, Li T, Cong L L, Feng Q, Zhao X L, Cao X Y 2024 *Opt. Express.* **32** 24469
- [14] Jiang Y L, Tian Y X, Li J X, Yan C Y, Pan Y X 2024 *IEEE Photonics Technology. Lett.* **36** 1117
- [15] Yue H, Chen L, Yang Y Z, He L X, Shi X W 2019 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **18** 54
- [16] Zhang T H, Pang X Y, Zhang H, Zheng Q 2023 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **22** 665
- [17] Pu M B, Ma X L, Li X, Guo Y H, Luo X G 2017 *J. Mater. Chem. C* **5** 436
- [18] Guo Y H, Ma X L, Pu M B, Li X, Zhao Z Y, Luo X G 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1800592
- [19] Huang Y J, Luo J, Pu M B, Guo Y H, Zhao Z Y, Ma X L, Li X, Luo X G 2019 *Adv. Sci.* **6** 1801691
- [20] Xue J J, Jiang W, Gong S X 2017 *Int. J. Antennas Propag.* **2017** 1260973
- [21] Li T, Yang H H, Li Q, Jiadi L R, Cao X Y, Gao J 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 5325
- [22] Li T, Yang H H, Li Q, Liao J W, Gao K, Ji K F, Cao X Y 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 124101 (in Chinese) [李桐, 杨欢欢, 李奇, 廖嘉伟, 高坤, 季轲峰, 曹祥玉 2024 物理学报 **73** 124101]
- [23] Rana S, Jain P 2023 *Int. J. Microw. Wirel. Technol.* **15** 1108
- [24] Feng K S, Li N, Yang H H 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 194101 (in Chinese) [冯奎胜, 李娜, 杨欢欢 2021 物理学报 **70** 194101]
- [25] Liu Y, Jia Y T, Zhang W B, Wang Y Z, Guo S X, Liao G S 2019 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **67** 6199
- [26] Liu Y, Zhang W B, Jia Y T, Wu A Q 2021 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **69** 572
- [27] Sima B, Chen K, Luo X Y, Zhao J M, Feng Y J 2019 *Phys. Rev. Appl.* **10** 064043
- [28] Guo W L, Chen K, Wang G M, Luo X Y, Feng Y J, Qiu C W 2020 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **68** 1426
- [29] Yang Y J, Wang C C, Yang H L, Li S R, Zhou X F, Jin J 2024 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **72** 6464

Dual-polarized low-RCS metasurface antenna based on amplitude-phase modulation*

WU Tianhao YANG Huanhuan[†] LI Tong[‡] JI Kefeng
ZHANG Zhiyun LIAO Jiawei ZOU Jing

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

(Received 26 June 2025; revised manuscript received 27 July 2025)

Abstract

To address the challenges of the complex design process and long optimization time for antenna radar cross section (RCS) reduction, this paper adopts the low-RCS antenna design concept of “first scattering then radiation” and implements dual-polarized RCS reduction of the antenna based on the hybrid mechanism. A dual-polarized low-scattering metasurface antenna is proposed, which overcomes the drawbacks of traditional low-RCS antenna design methods. Firstly, a dual-polarized low-RCS metasurface antenna is designed based on the amplitude and phase control characteristics of the metasurface, achieving independent control of the reflected beams for different polarized incident waves. Secondly, drawing on the radiation structure of traditional patch antennas, a local adjustment is made to the metasurface based on the low RCS metasurface. The antenna radiation is achieved through coaxial feed excitation. Finally, combined with the current

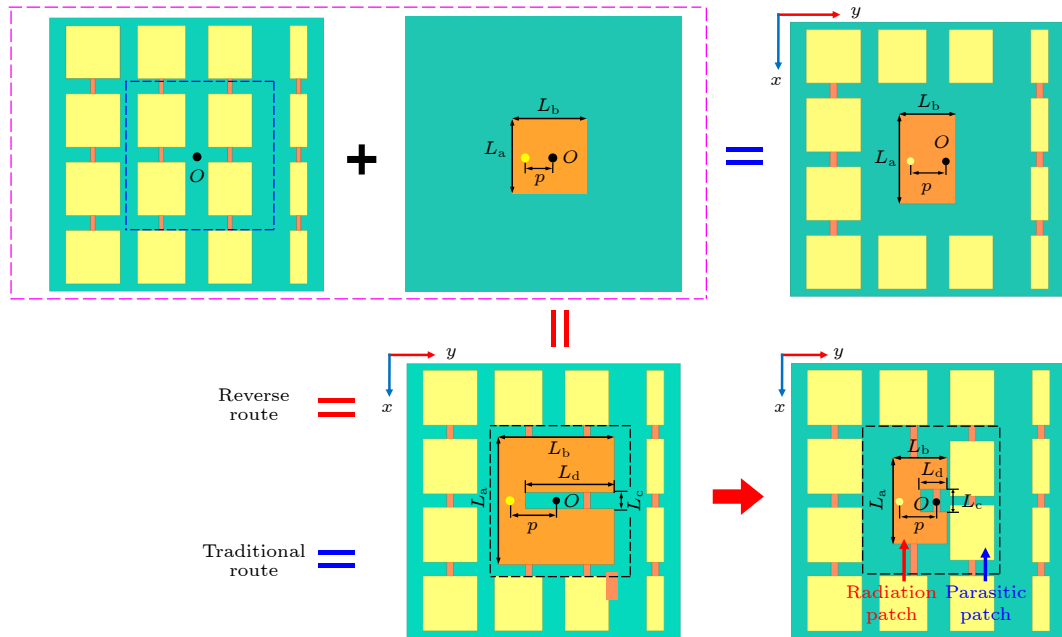
* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62371466, 62401618, 62171460) and the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2024JC-ZDXM-39, 2025JC-YBMS-708, 20220104, 2020022).

[†] Corresponding author. E-mail: jianye8901@126.com

[‡] Corresponding author. E-mail: tongli8811@sina.com

distribution adjustment of the radiation structure, the antenna radiation performance is rapidly optimized.

Through simulation and experimental verification, the proposed antenna not only has good radiation performance but also can achieve the reduction of dual-polarized RCS reduction inside and outside the frequency band. Compared with the traditional low-RCS antenna design methods, the reverse design concept of “first scattering then radiation” adopted in this work and the new method of reducing the dual-polarized RCS reduction of the antenna based on a hybrid mechanism effectively resolve the contradiction between radiation and low scattering caused by the compact structure of the metasurface antenna, greatly simplifying the design process of the low-scattering metasurface antenna. The antenna adopts a single-layer dielectric design to achieve RCS reduction, and has the characteristics of simple structure, compactness, and low profile.



Keywords: electromagnetic metasurface, antenna, amplitude-phase modulation, low radar cross section

PACS: 41.20.Jb, 78.67.Pt, 73.20.Mf

DOI: 10.7498/aps.74.20250838

CSTR: 32037.14.aps.74.20250838

基于幅相调控特性的双极化低散射超表面天线

吴天昊 杨欢欢 李桐 季轲峰 张芷昀 廖嘉伟 邹靖

Dual-polarized low-RCS metasurface antenna based on amplitude-phase modulation

WU Tianhao YANG Huanhuan LI Tong JI Kefeng ZHANG Zhiyun LIAO Jiawei ZOU Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 204101 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250838

CSTR: 32037.14.aps.74.20250838

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250838>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于共享孔径技术的低RCS电磁超构表面天线设计

Low-RCS electromagnetic metasurface antenna based on shared-aperture technique

物理学报. 2024, 73(12): 124101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240142>

电磁超构表面与天线结构一体化的低RCS阵列

A novel low-RCS antenna array based on integration of electromagnetic metasurface and conventional antenna

物理学报. 2021, 70(19): 194101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210746>

幅相同调的吸波-对消雷达散射截面减缩超表面设计

Absorption and cancellation radar cross-section reduction metasurface design based on phase- and amplitude-control

物理学报. 2022, 71(8): 084102 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212174>

一种基于频率可重构的超宽带1比特相移超表面

A frequency-reconfigurable ultra-wideband 1-bit phase-shifting metasurface

物理学报. 2025, 74(18): 184101 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250636>

有源器件混合集成的超薄超宽带可调雷达吸波体

Ultra-thin ultra-wideband tunable radar absorber based on hybrid incorporation of active devices

物理学报. 2022, 71(3): 034101 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211254>

基于卷积神经网络的双站雷达散射截面减缩超表面设计

Design of bistatic radar cross section reduction metasurface based on convolutional neural networks

物理学报. 2025, 74(10): 107802 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250109>